空间故障网络及其与空间故障树的转换 *

崔铁军 [1, 2, 3†]，李莎莎 [1, 2]，朱宝艳 [1]

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院，辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室，辽宁 阜新 123000; 3. 大连交通大学 辽宁省隧道与地下结构工程技术研究中心，辽宁 大连 116028)

摘　要：空间故障树是一种研究系统可靠性与影响因素关系的理论体系，用树型结构描述元件与系统之间的可靠性关系。但实际故障发生过程是复杂的，难以表示成树型结构，而更为广泛的是网状结构。因此，尝试将空间故障树中的树型结构转换为网络结构，进而形成空间故障网络。给出空间故障网络的定义、性质及其与空间故障树的转换方法。目的是将空间故障网络转换为空间故障树，以利用空间故障树已有研究结果。给出一般结构和多向环结构的空间故障网络，及其转换为空间故障树的方法。为使用空间故障树理论研究一般网络结构故障发生过程提供方法。

关键词：安全系统工程；空间故障树；空间故障网络；转换方法

中图分类号：X913.4　　doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.01.0072

Construction space fault network and recognition network structure characteristic

Cui Tiejun[1, 2, 3], Li Shasha[1, 2], Zhu Baoyan[1]

(1. *College of Safety Science And Engineering Liaoning Technical University*, *Fuxin Liaoning* 123000, *China*; 2. *Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters And Control of Ministry of Education*, *Fuxin Liaoning* 123000, *China*; 3. *Tunnel & Underground Structure Engineering Center of Liaoning*, *Dalian Jiaotong University*, *Dalian Liaoning* 116028, *China*)

Abstract: The space fault tree is a theoretical system to study the relationship between the system reliability and influencing factors. The tree structure is used to describe the relationship. But the actual fault process is complicated, it is difficult to represent the tree structure, and the more general is the network structure. Therefore, this paper attempted to transform the tree structure in the space fault tree into a network structure, and then form a space fault network. The definition and properties of the space fault network and the transformation method with the space fault tree are given. The purpose is to transform the space fault network into space fault tree, and to make use of the existing research results of the space fault tree. The space fault network has the general structure and the multi direction ring structure, and the transforming method into a space fault tree is given. In order to use the space fault tree, a method for the fault process of general network structure is provided.

Key words: safety system engineering; space fault tree; space fault network; transformation method

0　引言

故障树是安全系统工程基础理论之一。在当今系统可靠性研究领域极为重要，也是学界研究的重点。许多学者对故障树理论在不同方面进行了应用，并提出了改进方法。例如在医学方面，故障树应用于手足口病的控制分析[1]；利用故障树分析法处理硫化氢的实验室规模生物反应器的安全性[2]。在不确定性问题研究方面，使用事故树处理不确定性问题[3]；使用决策树基于概率和可能性来表示不确定性[4]；依赖基本事件的故障树模型的不确定性分析[5]；通过混合概率—可能性框架处理故障树分析中的不确定性[6]。在系统可靠性分析方面，基于事故树提出了实时的系统分析方法[7]；研究了非可修系统的优先级和与门动态故障树模型[8]。在系统的安全分析方面，使用扩展故障树分析了自治系统的安全[9]。在电气系统方面，利用多值Fisher 模糊决策树对模拟电路故障进行诊断[10]；使用概率故障树对辐射处理系统进行了分析[11]；应用事故树诊断燃料电池故障[12]；利用故障树分析了不间断电源系统可靠性[13]。在交通运输方面，基于时序故障树对铁路运输系统风险进行了评估[14]；另外，提出了故障树分析中基本事件的一种排序方法[15]；基于二元决策图的有效排序启发式算法的故障树分析[16]；基于IRVPM and SBDD 的高度耦合动态事故树的定量分析[17]；基于结构函数耦合和蒙特卡洛仿真的动态故障树定量分析[18]；提出了动态故障树分析中的一种有效的近似马尔可夫链方法[19]；基于结构函数的动态故障树定量分析[20]。

收稿日期：2018-01-25；修回日期：2018-03-15　　基金项目：国家自然科学基金资助项目（51704141，51674127）

作者简介：崔铁军（1983-），男（通信作者），辽宁沈阳人，副教授，博士（后），主要研究方向为系统可靠性及力学系统稳定性（ctj.159@163.com）.

但这些研究难以分析多因素影响下的系统可靠性特征，不具备逻辑分析和大数据处理能力。因此笔者提出了空间故障树理论，详见第 1 章论述。但空间故障树的基础是经典故障树，是一种具有树型结构的故障因果关系表示方法。但实际故障发展过程往往不能表示成理想的故障树形式，更为一般的是网络结构的故障发生过程。即各种原因和结果相互交织，共同作用于最终故障。其不能表示成故障树形式，更无法使用空间故障树理论进行分析。

为解决该问题，同时利用空间故障树现有研究成果，提出空间故障网络概念。将一般的故障发生过程用网络拓扑形式表示，在通过一定的方式将其转换为空间故障树进行处理。本文主要给出了空间故障网络的定义、性质；图形化表示方法；空间故障网络与空间故障树的转换方法；故障网络性质及故障概率计算等。空间故障网络的提出是空间故障树理论解决实际故障过程的泛化，是进一步使用空间故障树理论研究故障一般规律的基础。

1　空间故障树

为了解系统工作环境因素对系统可靠性的影响，提出了一套空间故障树（space fault tree，SFT）理论[21]。该理论认为系统工作于环境之中，由于组成系统的基本事件或物理元件的性质，决定了系统在不同条件下工作的故障发生概率不同。SFT 产生了三个分支：连续型空间故障树（continuous space fault tree，CSFT）、离散型空间故障树（discrete space fault tree，DSFT）和系统结构反分析（inward analysis of structural systems，IASS）。CSFT 是一种知道系统内部构造和元件性质，再研究系统在外界作用下响应行为的一种白盒方法。相对应，DSFT 不需要了解系统内部构造和元件性质，研究基础是系统对外界环境变化所进行的响应特征，即黑盒方法。IASS 在不清楚系统内部具体构造情况下，通过系统对外界环境因素变化的响应来剖析和窥探系统内部结构。

对于 CSFT，首先提出了 SFT 基本思想和方法[22]，研究了 SFT 的径集域与割集域[23]、因素重要度分布等概念[24]。同时利用上述基本概念完成了一些研究，包括维持系统可靠性方法[25]、系统可靠性决策规则发掘方法[26]、系统可靠性评估方法[27]及其优化[28]等。

对于 DSFT，首先给出了 DSFT 的定义和性质[29]，后研究了 DSFT 的建立及故障概率空间分布[30]和故障概率变化趋势[31]。提出使用因素投影拟合法得到特征函数[32]。使用模糊结构元理论得到模糊结构元化特征函数[33,34]。使用云模型理论得到云化特征函数[35]，进而完成了对离散故障数据的表示及处理方法。

对于 IASS，主要研究了二值的 01 型 SFT 的表示和分析方法。分析方法为逐条分析法和分类推理法[36]，结构化表示方法为图法和表法[37]。

结合 SFT 与因素空间理论完成了一些研究，包括属性圆定义及其在对象分类中的应用[38]。考虑范围属性的系统安全分类决策规则研究[39]、煤矿安全情况区分方法研究[40]。这些研究证明了 FS 与 SFT 结合的可行性。同时也进行了一些系统可靠性分析研究[41]。

这些研究为空间故障树打下了坚实的理论基础。

2　基本定义

空间故障网络的处理需要借助 SFT 理论，所以空间故障网络的基本定义借鉴了 SFT。

定义 1　空间故障网络（space fault network, SFN）。产生系统故障事件组成的拓扑结构。用 $W=(X,L,R,B,\mathrm{B})$ 表示，其中：X 代表网络中的节点集合，即事件；L 代表网络中的连接集合；R 代表网络跨度集合；B 代表网络宽度集合；B 代表布尔代数系统。

定义 2　节点。SFN 中的节点代表故障发生过程的事件，故障网络中多个节点可以表示同一个事件，但不是同一次事件；一个事件的一次发生只对应一个节点。SFN 的节点按照故障的发展可分为三类。用 v_i 表示，节点集合 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_I\}$，共有 I 个节点。

第一类称为边缘事件，即导致故障的基本事件，是故障发生的源头，在故障网络中没有任何事件导致边缘事件发生。对应于故障树的基本事件。

第二类称为过程事件，即故障发生过程中，由于边缘事件或其他过程事件导致的事件，同时也导致其他过程事件或最终事件。对应于故障树中的中间事件。

第三类称为最终事件，即过程事件导致的事件，但在故障网络中不导致任何其他事件发生。

定义 3　事件的发生概率。事件的发生概率与 SFT 中的定义相同，用特征函数 p_i 表示。

定义 4　连接。故障发生过程中事件之间的影响传递，连接存在于两个事件之间。连接是有向的，从原因事件指向结果事件。用 l_j 表示，连接集合 $L=\{l_1,l_2,\cdots,l_J\}$，共有 J 个连接。原因事件可以是边缘事件和过程事件。结果事件可以是过程事件和最终事件。

定义 5　路径。从一个事件到另一个事件过程中的多个连接的组合。这些连接具有统一的方向。用 E_f 表示，路径集合 $E=\{e_1,e_2,\cdots,e_F\}$，共有 F 个路径。

定义 6　传递概率。原因事件可导致结果事件的传递概率，即原因事件发生后导致结果事件发生的概率。用 p_j 或 $p_{原因事件\to结果事件}$ 表示。

定义 7　SFN 的跨度。指两个事件之间经过的连接数量。用于衡量故障发生的过程复杂程度。一个事件与边缘事件的最大跨度称为该事件的模跨度。最终事件的模跨度是故障网络中的最大跨度。用 r_o 表示，跨度集合 $R=\{r_1,r_2,\cdots,r_O\}$，共有

O 个跨度。

定义 8 SFN 的宽度。指故障网络中一个事件所涉及的所有边缘事件的所有节点的总数。用于衡量故障原因的复杂度。一个事件的最大宽度称为该事件的模宽度。最终事件的模宽度是故障网络中的最大宽度。用 b_m 表示，宽度集合 $B=\{b_1,b_2,\cdots,b_M\}$，共有 M 个跨度。

定义 9 事件之间的逻辑关系。过程事件和最终事件都包含了引起它们发生的所有事件的逻辑关系。这些逻辑关系包括“与”、“或”、“非”，与故障树的逻辑关系相同。用（B，∨，∧，$\overline{\ \ }$）表示。

3 SFN 的图形化表示

SFN 转换为 SFT 的前提是对故障发生过程的图形化表示。两种最基本的 SFN 结构如图 1 所示。

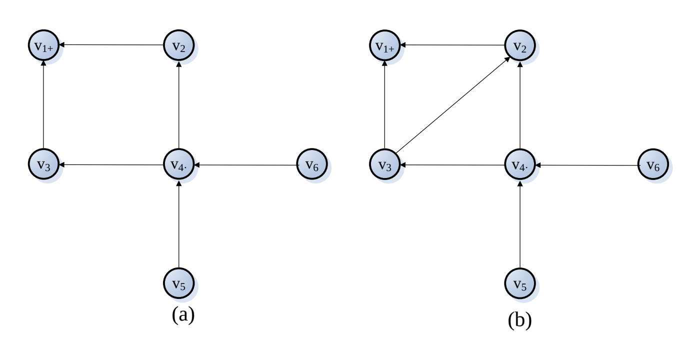


图 1　两种 SFN

图 1（a）为一个最基本的 SFN，网络由 6 个事件组成，分别为 $v_{1\text{-}6}$。根据定义 2，边缘事件为 v_5，v_6；过程事件为 v_2，v_3，v_4；最终事件 v_1。定义 4 的连接是图中的有向箭头线段。定义 7 和 8 中的跨度和宽度需要借助 SFT 转换得到，下章进行介绍。定义 9 逻辑关系，“与或”关系至少是二元运算，即需要两个原因事件才能完成，如图中 v_1，v_4。v_{1+}表示原因事件 v_2，v_3 是“或”关系，造成 v_1 发生；$v_{4\cdot}$表示原因事件 v_5，v_6 是“与”关系，造成 v_4 发生。如果原因事件和结果事件是一一对应的，且不是“非”关系，则不需要在结果事件中标注逻辑关系。

图 1（a）是最简单的故障网络。其中连接方向是恒定的，不存在多向环结构。

图 1（b）在（a）的基础上出现了多向环结构，如 $v_3\to v_1$ 及 $v_3\to v_2\to v_1$。这样会产生相同原因事件和结果事件之间的跨度不同的现象。即相同的原因事件经历不同过程导致相同的结果事件，这样在进行 SFT 转换过程中采取的措施是不同的。这过程中结果事件及原因事件的逻辑关系有关。

上述两种故障网络是基本形式，不同形式转换为 SFT 的形式和方法不同。下章给出 SFN 转换为 SFT 的具体形式和方法。

4 SFN 与 SFT 的转换

SFN 是 SFT 的重要组成部分，是 SFT 理论应用于更广泛故障过程分析的基础。由于树型结构是网络结构的特殊形式，将故障过程表示为故障网络具有更为普遍的适用性。SFT 是在树型拓扑中研究故障概率与因素的因果关系；SFN 是在网状拓扑中研究因果关系，它们方法类似但拓扑结构不同。SFT 理论已提出了一些定义和方法，那么 SFN 如何实现相应功能是研究重点。可通过两种方法实现，一是针对故障网络特点从新研究分析方法；二是将 SFN 转换为 SFT，使用现有的 SFT 方法进行处理。这里给出 SFN 转换为 SFT 的方法。

如图 1 可知，SFN 具有两种基本形式。这两种结构表示的故障过程不同，转换为 SFT 的方法也不同。

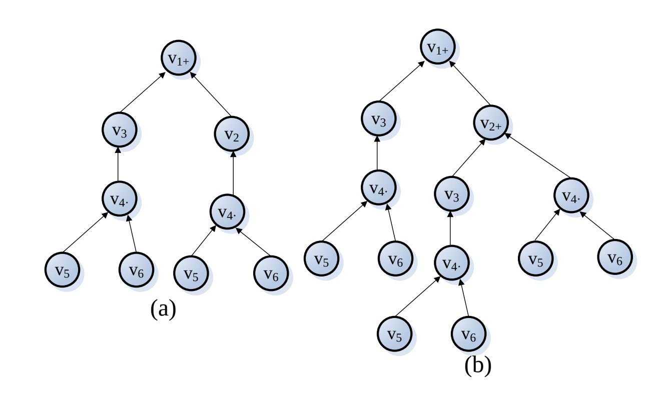


图 2　转换后的 SFT

图 2 给出了图 1 中 SFN 转换为 SFT 的结果。图 2（a）和（b）分别对应图 1（a）和（b）。SFT 中只有事件，而 SFN 同时具有事件和连接的概念。

从图 2（a）可知，从最终事件出发进行 SFT 构建。v_1 的原因事件为 v_3 和 v_2；v_3 的原因事件是 v_4；v_2 的原因事件是 v_4；v_4 的原因事件为 v_5 和 v_6。从最终原因事件向边缘事件的逆序故障发生过程寻找，从而可绘制该 SFT。

从图 2（b）可知，存在 $v_3\to v_1$ 及 $v_3\to v_2\to v_1$ 两个不同的发生过程，添加 v_2 的原因事件为 v_3 和 v_4，逻辑关系为“或”。与图 2（a）相比增加了一个连接，即 $v_3\to v_2$。那么对于 v_2，其原因事件与 v_1 的原因事件相同，则可将图 2（a）中 v_3 的原因事件过程直接作为 v_2 原因事件过程的一个分支，从而形成图 2(b)。

最终，SFN 转换为 SFT 是从最终事件开始的，转换是故障发生过程的逆序。从最终故障开始，寻找结果事件对应的原因事件，即沿着连接反方向寻找。以结果事件形成树根，分支数量为连接指向本结果事件的数量，即导致本结果事件的原因事件。如果该原因事件被连接指向，那么将其作为结果事件，根据上述方法继续寻找其他的原因事件。直至寻找得到的原因事件均为边缘事件，转换停止。

5 结束语

本文在 SFT 基础上提出了 SFN 的概念，主要结论如下：

a）构建了 SFN 基础定义和方法。SFN 是 SFT 的扩展，用于处理具有网络特征的故障发生过程。给出了相关定义，图形化表示方法。

b）给出了两种不同的 SFN 网络结构与 SFT 转换的方法，

包括一般结构和多向环结构。SFN 转换为 SFT 是从最终事件开始的，是故障发生过程的逆序。一般结构和多向环结构的转化方法相同，即逆序转换。

目前提出的 SFN 方法及其与 SFT 的转换只能处理较为简单的网络故障发生过程，更为复杂的网络拓扑与树型结构的转换有待进一步研究。

参考文献：

[1] Isoda N, Kadohira M, Sekiguchi S, *et al.* Review: evaluation of foot-and-mouth disease control using fault tree analysis [J]. Transboundary and Emerging Diseases, 2013, 62 (3): 233-244.

[2] Zytoon M A, El-Shazly A H, Noweir M H, *et al.* Quantitative safety analysis of a laboratory-scale bioreactor for hydrogen sulfide biotreatment using fault tree analysis [J]. Process Safety Progress, 2013, 32 (4): 376-386.

[3] Ferdous R, Khan F, Sadiq R, *et al.* Fault and event tree analyses for process systems risk analysis: uncertainty handling formulations [J]. Risk Analysis, 2011, 31 (1): 86-107.

[4] Flage R, Baraldi P, Zio E, *et al.* Probability and possibility-based representations of uncertainty in fault tree analysis [J]. Risk Analysis, 2012, 33 (1): 121-133.

[5] Pedroni N, Zio E. Uncertainty analysis in fault tree models with dependent basic events [J]. Risk Analysis, 2013, 33 (6): 1146-1173.

[6] Wang Dong, Zhang Yan, Jia Xiang, *et al.* Handling uncertainties in fault tree analysis by a hybrid probabilistic-possibilistic framework [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2015, 32 (3): 1137-1148.

[7] Remenyte-Prescott R, Andrews J D. An efficient real-time method of analysis for non-coherent fault trees [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2009, 25 (2): 129-150.

[8] Ge Daochuan, Li Dong, Chou Qiang, *et al.* Quantification of highly coupled dynamic faulttree using IRVPM and SBDD [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2014, 32 (1): 139-151.

[9] ÅSlund J, Biteus J, Frisk E, *et al.* Safety analysis of autonomous systems by extended fault tree analysis [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2007, 21 (2): 287-298.

[10] Cui Yiqian, Shi Junyou, Wang Zili. Analog circuits fault diagnosis using multi-valued Fisher's fuzzy decision tree (MFFDT) [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2015, 44 (1): 240-260.

[11] Ekaette E, Lee R C, Cooke D L, *et al.* Probabilistic fault tree analysis of a radiation treatment system [J]. Risk Analysis, 2008, 27 (6): 1395-1410.

[12] Steiner N Y, Hissel D, Mootéguy P, *et al.* Application of fault tree analysis to fuel cell diagnosis [J]. Fuel Cells, 2012, 12 (2): 302-309.

[13] Rahmat M K, Jovanovic S. Reliability modelling of uninterruptible power supply systems using fault tree analysis method [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19 (2): 814-826.

[14] Peng Zhaoguang, Lu Yu, Miller A, *et al.* Risk assessment of railway transportation systems using timed fault trees [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2016, 32 (1): 181-194.

[15] Huang Hongzhong, Zhang Hua, Li Yanfeng. A new ordering method of basic events in fault tree analysis [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2012, 28 (3): 297-305.

[16] Mo Yuchang, Zhong Farong, Liu Huawen, *et al.* Efficient ordering heuristics in binary decision diagram–based fault tree analysis [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2013, 29 (3): 307-315.

[17] Ge Daochuan, Yang Yanhua. Reliability analysis of non-repairable systems modeled by dynamic fault trees with priority AND gates [J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2015, 31 (6): 809-822.

[18] Merle G, Roussel J M, Lesage J J, *et al.* Quantitative analysis of dynamic fault trees based on the coupling of structure functions and monte carlo simulation [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2014, 32 (1): 7-18.

[19] Yevkin O. An efficient approximate markov chain method in dynamic fault tree analysis [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2015, 32 (4): 1509-1520.

[20] Merle G, Roussel J M, Lesage J J. Quantitative analysis of dynamic fault trees based on the structure function [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2014, 30 (1): 143-156.

[21] 崔铁军. 空间故障树理论研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015. (Cui Tiejun. Study theory of space fault tree [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.)

[22] 崔铁军, 马云东. 多维空间故障树构建及应用研究 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23 (4): 32-37. (Cui Tiejun, Ma Yundong. Research on multi-dimensional space fault tree construction and application [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23 (4): 32-37.)

[23] 崔铁军, 马云东. 空间故障树的径集域与割集域的定义与认识 [J]. 中国安全科学学报, 2014, 24 (4): 27-32. (Cui Teijun, Ma Yundong. Definition and understand on size set domain and cut set domain based on multi-dimensional space fault tree [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24 (4): 27-32.)

[24] 崔铁军, 马云东. 连续型空间故障树中因素重要度分布的定义与认知 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25 (3): 24-28. (Cui Tiejun, Ma Yundong. The definition and cognition of the factor importance distribution in Continuous Space Fault Tree [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25 (3): 24-28.)

[25] 崔铁军, 马云东. 基于多维空间事故树的维持系统可靠性方法研究 [J]. 系统科学与数学, 2014, 34 (6): 682-692. (Cui Teijun, Ma Yundong. Research on the maintenance method of system reliability based on multi-dimensional space fault tree [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2014, 34 (6): 682-692.)

[26] 崔铁军, 马云东. 系统可靠性决策规则发掘方法研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35 (12): 3210-3216. (Cui Tiejun, Ma Yundong. The method research on decision criterion discovery of system reliability [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35 (12): 3210-3216.)

[27] 李莎莎，崔铁军，马云东. 基于空间故障树理论的系统可靠性评估方法研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11 (6): 68-72. (Li Shasha, Cui Tiejun, Ma Yundong. System reliability assessment method based on space fault tree [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11 (6): 86-92.)

[28] 崔铁军，马云东. 基于 SFT 理论的系统可靠性评估方法改造研究 [J]. 模糊系统与数学, 2015, 29 (5): 173-182. (Cui Tiejun, Ma Yundong. Reliability assessment method based on space fault tree [J]. Fuzzy System and Mathematics, 2015, 29 (5): 173-182.)

[29] 崔铁军，马云东. 离散型空间故障树构建及其性质研究 [J]. 系统科学与数学, 2016, 36 (10): 1753-1761. (Cui Tiejun, Ma Yundong. Discrete space fault tree construction and application research [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36 (10): 1753-1761.)

[30] 崔铁军，马云东. DSFT 的建立及故障概率空间分布的确定 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36 (4): 1081-1088. (Cui Tiejun, Ma Yundong. Discrete space fault tree construction and failure probability space distribution determine [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36 (4): 1081-1088.)

[31] 崔铁军，李莎莎，马云东，等. 基于 ANN 求导的 DSFT 中故障概率变化趋势研究 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34 (2): 449-452. (Cui Tiejun, Li Shasha, Ma Yundong, *et al.* Research on trend of failure probability in DSFT based on ANN derivation [J]. Application Research of Computers, 2017, 34 (2): 449-452.)

[32] 崔铁军，马云东. DSFT 中因素投影拟合法的不精确原因分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36 (5): 1340-1345. (Cui Tiejun, Ma Yundong. Inaccurate reason analysis of the factors projectionfitting method in DSFT. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36 (5): 1340-1345.)

[33] 崔铁军，马云东. DSFT 下模糊结构元特征函数构建及结构元化的意义 [J]. 模糊系统与数学, 2016, 30 (2): 144-152. (Cui Tiejun, Ma Yundong. The construction of fuzzy structured element characteristic function and the significance of structure elemented in DSFT [J]. Fuzzy System and Mathematics, 2016, 30 (2): 144-152.)

[34] 崔铁军，马云东. 基于模糊结构元的 SFT 概念重构及其意义 [J]. 计算机应用研究, 2016, 33 (7): 1957-1960. (Cui Tiejun, Ma Yundong. SFT concept reconstruction and its significance based on Fuzzy structured element [J]. Application Research of Computers, 2016, 33 (7): 1957-1960.)

[35] Li Shasha, Cui Tiejun, LIU Jian. Study on the construction and application of cloud space fault tree [J]. Cluster Computing, 2017 (2): 1-21.

[36] 崔铁军，汪培庄，马云东. 01SFT 中的系统因素结构反分析方法研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36 (8): 2152-2160. (Cui Tiejun, Wang Peizhuang, Ma Yundong. Inward analysis of system factor structure in 01 space fault tree [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36 (8): 2152-2160.)

[37] Cui Tiejun, Wang Peizhuang, Li Shasha. The function structure analysis theory based on the factor space and space fault tree [J]. Cluster Computing, 2017, 20 (2): 1387-1398.

[38] 崔铁军，马云东. 因素空间的属性圆定义及其在对象分类中的应用 [J]. 计算机工程与科学, 2015, 37 (11): 2170-2174. (Cui Tiejun, Ma Yundong. Definition of the attribute circle in factors space and its application in object classification [J]. Computer Engineering & Science, 2015, 37 (11): 2170-2174.)

[39] 崔铁军，马云东. 考虑范围属性的系统安全分类决策规则研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10 (11): 6-9. (Cui Tiejun, Ma Yundong. System security classification decision rules considering the scope attribute [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10 (11): 6-9.)

[40] 崔铁军，马云东. 基于因素空间的煤矿安全情况区分方法的研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35 (11): 2891-2897. (Cui Tiejun, Ma Yundong. Research on the classification method about coal mine safety situation based on the factor space [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35 (11): 2891-2897.)

[41] Cui Tiejun, Li Shasha. Study on the relationship between system reliability and influencing factors under big data and multi-factors [J]. Cluster Computing, 2017 (3): 1-23.